

# 基于 GMAW 堆焊成形的堆焊层焊道 搭接量及力学性能研究

江祥胜, 许燕, 周建平, 单雪海

(新疆大学 机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:**以基于 GMAW 堆焊成形的堆焊层为研究对象,研究了其焊道搭接量模型,重点分析了焊道搭接量对堆焊层成形表面平整度的影响。通过试验对搭接模型的可靠性进行了验证,并对堆焊层横截面整体显微硬度进行测试,对堆焊层水平方向的力学性能进行了拉伸试验。结果表明:采用电流 115 A、送丝速度 50 mm/s、焊接速度 6 mm/s 这组成形工艺参数时,成形质量相对稳定,堆焊层成形表面平整度好;堆焊层的硬度从焊道底部向上逐渐增大,大致在 150~180 HV 之间;堆焊层拉伸性能好,断口为韧性断裂,塑形好,能满足零件的使用性能要求。

**关键词:**GMAW 堆焊成形;焊道搭接量;堆焊层;显微硬度

**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.2017.11.008

中图分类号: TG455

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2017)11-0028-04

## Research on Weld Overlap and Mechanical Properties of Surfacing Layers Based on GMAW Surfacing Forming

JIANG Xiangsheng, XU Yan, ZHOU Jianping, Shan Xuehai

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

**Abstract:** Taking GMAW surfacing forming as the research object, the weld overlap model was established, and the influence of the weld overlap on the surfacing forming surface's smooth degree was analyzed. The reliability of overlap model was validated through test. The microhardness of cross section of surfacing layer and the mechanical properties in horizontal direction of surfacing layer were tested. The results show that when the current is 115 A, wire feeding speed is 50 mm / s and welding speed is 6 mm / s, the forming quality is relatively stable, and the smooth degree of surfacing layer forming is good. The surfacing layer's microhardness increases from bottom to top of the bead, which is about between 150-180HV. The tensile properties of surfacing layer are good, the fracture is ductile fracture, and its plasticity is good. It can meet the performance requirements of parts.

**Key words:** GMAW surfacing forming; weld overlap; surfacing layer; microhardness

金属快速成形技术是快速成形技术的一个重要分支,也是金属零件快速制造技术未来发展的必然方向。目前,快速成形过程中使用的材料主要有工程塑料、光敏树脂、锡箔纸和金属粉末等。其中,非金属材料成形的零件一般只能用于模型展示和设计评估,零件的力学性能较差,而金属材料成形零件的综合力学性能良好、致密度高、成形尺寸精度高。因此,金属材料的快速成形工艺研究对金属零件的快速制造有着很重要的意义<sup>[1-3]</sup>。目前,金属快速成形

的方法主要有选择性激光烧结 (Selective Laser Sintering, SLS)、选区激光熔化 (Selective Laser Melting, SLM)、激光近净成形 (Laser Engineered Net Shaping, LENS) 和三维堆焊 (Three-dimensional Welding) 技术<sup>[4-5]</sup>,其中,以大功率激光器作为热源熔化金属粉末的成形设备成本较高。熔化极气体保护焊 (Gas Metal Arc Welding, GMAW) 技术以其高效、易于实现自动化、金属零件成形强度高、材料以及设备成本低等优势,正成为一种重要的金属三维成形技术,同时基于 GMAW 堆焊成形的堆焊技术也在三维堆焊领域得到了广泛的应用。

在堆焊成形过程中,焊道搭接量是影响堆焊质量的一个非常重要的因素,它不仅决定了两相邻焊道中心的距离和堆焊成形的高度,还在很大程度上决定了堆焊成形的表面平整度,从而影响成形过程

收稿日期:2016-06-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51365053);自治区科技人才培养项目资助(gn2015yx008)

作者简介:江祥胜(1992-),男,湖南永州人,硕士,主要研究方向:金属堆焊成形设备研制与成形工艺研究;电话:15099196294;

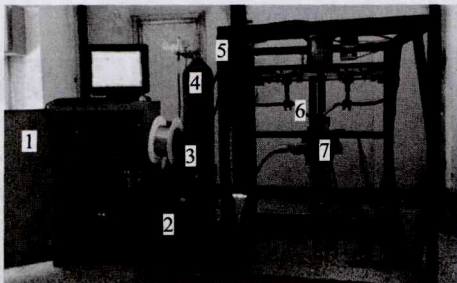
E-mail:m15099196294@163.com

的完成以及成形件的精度<sup>[6]</sup>。因此,研究焊道搭接模型,并通过试验对搭接模型可靠性以及堆焊层性能进行验证和分析,对堆焊成形质量有重要意义。

### 1 试验方法

试验中焊接电源采用NBC250-F系列二氧化碳气体保护焊机,成形设备为新疆大学自主研制的金属堆焊成形平台,设备如图1所示。保护气体采用二氧化碳和氩气的混合气体,焊丝采用ER50-6,堆焊基板采用Q235B基板,试验采用如图2所示的方式进行,在试验前将堆焊基板加工成150mm×50mm×8mm的板材。表1为ER50-6焊丝的化学成分,表2为ER50-6焊丝堆焊成形后熔敷金属的力学性能,表3为堆焊成形基板Q235B的化学成分。

利用VTA401显微硬度仪对试样不同部位的



1- 控制系统;2- 焊接电源;3- 送丝机构;4- 保护气;5- 三维运动机构  
6- 焊枪;7- 成形平台

图1 堆焊成形平台实物图

Fig.1 Physical diagram of surfacing forming platform

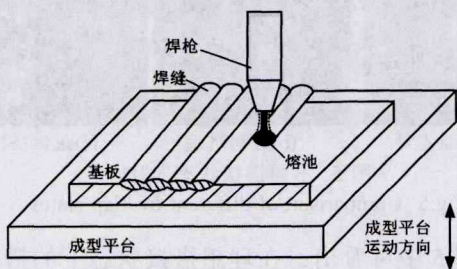


图2 堆焊试验方法示意图

Fig.2 Schematic diagram of surfacing test method

表1 ER50-6焊丝化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of ER50-6 welding wire (wt%)

C	Mn	Si	S	P	Cu
0.06~0.15	1.4~1.85	0.8~1.15	≤0.035	≤0.025	≤0.050

表2 熔敷金属力学性能

Tab.2 Mechanical properties of deposited metal

试验项目	$R_m$ /MPa	$R_a$ /MPa	A(%)	$KV_2$ /J
保证值	≥500	≥420	≥22	≥27(-30℃)
一般结果	558	472	27	98

表3 Q235B化学成分(质量分数,%)

Tab.3 Chemical composition of Q235B (wt%)

C	Mn	Si	S	P
0.12~0.20	0.30~0.70	≤0.30	≤0.045	≤0.045

硬度值进行测量,选用载荷500g,载荷时间为10s。利用线切割切取单道多层堆焊试样,根据国标GB/T228-2002对试样进行拉伸试验,并对断口形貌进行分析。

使用线切割从堆焊成形的试件切取试样,用不同型号的金相砂纸对试样进行打磨,在抛光机上进行抛光,最后利用4% $HNO_3$ 酒精溶液对试样表面进行腐蚀,利用正置金相显微镜MJ21对试样的微观组织结构进行观察。

### 2 试验结果与分析

堆焊层成形是指在成形平台内进行成形轨迹搭接的过程,一般是由多条成形轨迹按顺序搭接,因此为了保证成形质量和表面的平整性,相邻的成形轨迹应该按照一定的间距进行搭接。

在成形过程中,当相邻两条成形轨迹间的距离较远时,会导致成形表面存在低谷,从而导致成形表面平整度下降,影响下一层堆焊成形的质量,如图3(a)所示。当相邻两条成形轨迹间的距离较近时,又会导致成形表面出现凸起,也会影响到下一层堆焊成形的质量,如图3(c)为过度搭接时的状态,可以看出焊道高度会逐层增加。图3(b)为理想状态下的搭接,相邻成形轨迹搭接完成后成形表面为平面。

#### 2.1 焊道搭接模型的建立

通过前期的试验发现,焊道间的搭接量对于成形表面的质量影响很大,因此要在进行堆焊试验前确定搭接量。通过对搭接量建立数学模型,同时建立相应的搭接原则,来确定不同情况下搭接量的计算公式。利用这种方式能适应不同宽度的焊道间的搭

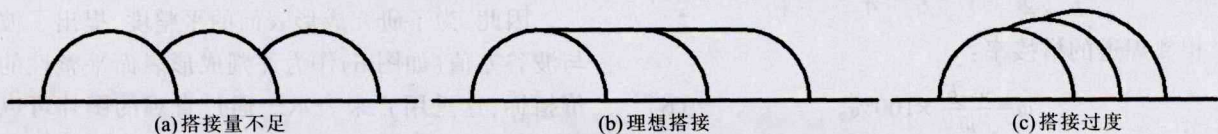


图3 搭接状态示意图

Fig.3 Schematic diagram of lap joint

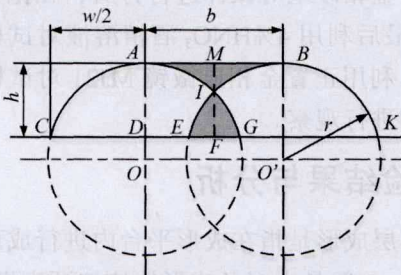
接问题。

在研究堆焊层成形过程中,为了便于计算,对模型进行简化处理:

(1) 堆焊成形的焊道轨迹的形状尺寸是均匀的,同时焊道截面是理想圆弧的一部分。

(2) 堆焊成形的焊道轨迹在焊枪移动方向的截面尺寸一致。

在堆焊成形的过程中,由于上一条焊道的存在,会使得当前焊道与上一条焊道搭接的部分形成熔融状态的金属(如图4曲边三角形  $EIG$ ),由于熔融金属表面张力的作用使得曲边三角形  $ABI$  得到填充。因此,这里存在一个中心距,能够保证熔融金属在表面张力的作用下使得  $A、M、B$  三点能在一条直线上,从而保证相邻两条焊道搭接后表面的平整性。



$w$ - 焊道宽度; $h$ - 焊道高度; $r$ - 焊道截面半径  
 $b$ - 相邻两条焊道间的中心距

图4 焊道理想搭接状态下的模型  
Fig.4 Bead overlap model in ideal state

理想状态下,相邻两条焊道搭接过程中,曲边三角形  $ABI$  和曲边三角形  $EIG$  的面积是相等的。

$$S_{\Delta ABI} = S_{\Delta EIG} \quad (1)$$

如图4所示  $O$  为坐标原点,两个三角形的相交点  $I$  的坐标为  $(x_I, y_I)$ , 它们的面积分别是:

$$S_{\Delta ABI} = \int_0^{x_I} (r - \sqrt{r^2 - x^2}) dx \quad (2)$$

$$S_{\Delta EIG} = \int_{x_I}^{w/2} (\sqrt{r^2 - x^2} - (r-h)) dx \quad (3)$$

可以求得  $I$  的坐标为:

$$x_I = \frac{1}{h} \left[ \frac{r^2}{2} \arcsin \frac{w}{2r} - \frac{w}{4} (r-h) \right] \quad (4)$$

从而求出相邻焊道之间的中心距:

$$b = 2x_I = \frac{2}{h} \left[ \frac{r^2}{2} \arcsin \frac{w}{2r} - \frac{w}{4} (r-h) \right] \quad (5)$$

相邻焊道的搭接率:

$$\varphi = \frac{w-b}{w} \times 100\% \quad (6)$$

上述公式为堆焊成形过程中相邻焊道间的搭接

模型,下面通过试验对搭接模型的可靠性进行验证,运用上述公式进行了不同试验作对比。

### 2.2 堆焊层焊道搭接量试验分析

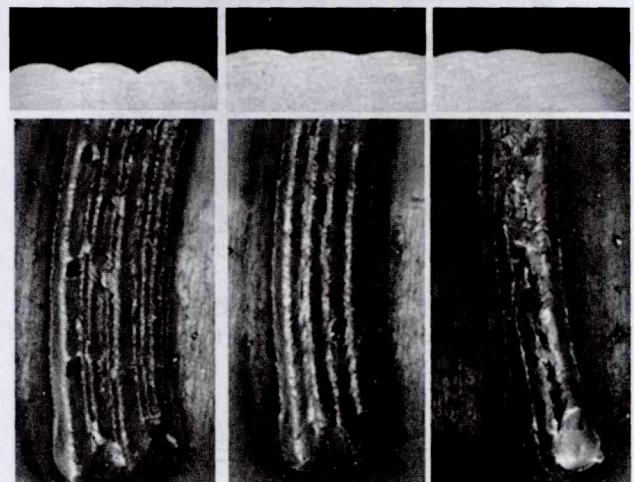
试验所用的材料,焊丝采用 ER50-6,基板材料采用 Q235B,进行如下试验:

(1) 用堆焊成形系统成形一条长度为 60 mm 的成形轨迹,并测量其熔宽和余高;

(2) 利用搭接计算公式计算出理想状态下的中心距;

(3) 分别按搭接量不足  $((b+1)\text{mm})$ 、理想搭接  $(b)$ 、搭接过度  $((b-1)\text{mm})$  三种方案与第 1 条成形轨迹进行搭接,各 3 条;

(4) 切取三种方案成形的试样,用显微镜对试样截面的 3 条成形轨迹高度,以及相邻焊道间波峰与波谷间的距离进行测量。图 5 为三种不同搭接间距成形的试件横截面和搭接表面形貌。



(a) 搭接量不足 (b) 理想搭接 (c) 过渡搭接

图5 不同搭接状态对比

Fig.5 Comparison of different overlap states

从图5中可看出,在理想搭接状态下的搭接完成后的成形表面并不是一个水平面,而是具有周期性波峰、波谷形式的表面,在每一道成形轨迹的中心位置会出现波峰,而在两条相邻的成形轨迹相交的地方会出现波谷,这是因为熔融状态下的金属熔滴在表面张力的作用下表面会收缩为曲面,因而不可能完全铺展为理想的平面。

因此,为了研究成形表面的平整度,提出了波峰与波谷差值(如图6)作为评判成形表面平整性的评价指标,这里用  $f_p$  来表示。通过直观的图片可以看出  $f_p$  的值越大那么成形表面的平整性就越差,而  $f_p$  的值越小成形表面的平整性就越好。表4是利用显

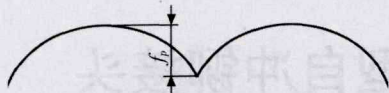


图6 波峰波谷之间的间距  
Fig.6 Spacing between the peak and valley

表4 不同搭接状态下的  $f_p$  测量值(mm)

搭接形式	$f_p$ 平均值	成型轨迹余高			
		2.26	2.30	2.15	2.20
搭接量不足	0.58	2.26	2.30	2.15	2.20
理想搭接	0.22	2.25	2.30	2.25	2.32
过渡搭接	0.41	2.30	2.40	2.44	2.40

显微镜放大后得到的不同搭接效果下  $f_p$  值。

从表中可看出:在搭接量不足时  $f_p$  最大,即成形轨迹波峰和波谷之间的间距较大,能够明显地看出表面不平整。理想搭接时  $f_p$  最小,成形轨迹波峰波谷之间的间距最小,成形表面平整度较好。在过度搭接时,由于相邻焊道之间搭接量过大导致成形表面中间部位会凸起,影响成形质量。

通过试验分析发现,焊接电流 115A、送丝速度 50mm/s、焊接速度 6mm/s 时焊道的形状较好,熔宽 5.2mm、余高 2.1mm,在这组成形工艺参数下的成形质量相对稳定,图7是利用这组参数进行堆焊层的堆焊成形效果。从图中可以看出,成形零件表面的平整性较好,能够满足精度要求不高的零件的成形。

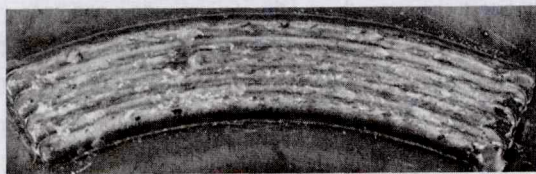


图7 堆焊层堆焊成形  
Fig.7 Surfacing forming of surfacing layer

### 2.3 堆焊层性能分析

#### 2.3.1 堆焊层硬度分析

为获得堆焊层的硬度分布,从试样的底部向上对10个点的显微硬度进行测量,结果如图8。从图中可以看出,试样的硬度分布与焊道测点的位置有关,显微硬度沿基板向上的方向逐渐增大,但硬度分布大致在 150~180HV。靠近顶部区域硬度大幅提升,在零件顶部硬度达到最大。零件底部的硬度值与基板 Q235 材料的硬度值相近,而在试样的中下部位置由于后道焊道的重熔加热和回火作用,形成粗大的等轴晶,导致焊道的硬度值降低。而顶层没有重熔加热的作用,形成的主要是柱状晶,硬度较高。

#### 2.3.2 堆焊层拉伸试验分析

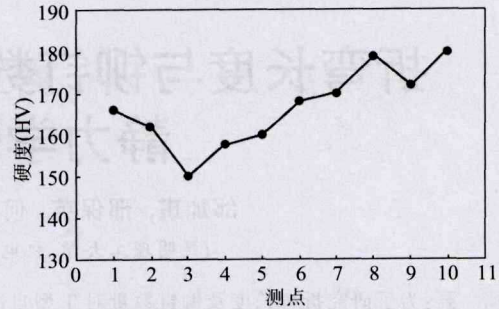


图8 堆焊层显微硬度分布  
Fig.8 Microhardness distribution of surfacing layer

对堆焊层零件水平方向进行了拉伸试验,试样按国标 GB/T228-2002 的要求利用线切割切取,并用砂纸进行打磨。拉伸试验在拉伸试验机上进行,在室温条件下,加载速率为 2mm/min,试验结果如表5,拉伸试样发生了明显的颈缩如图9所示,试件的抗拉强度与焊丝的抗拉强度接近,伸长率达到 33%。

表5 拉伸试验结果

Tab.5 Tensile test results

项目	抗拉强度 /MPa	伸长率(%)
试样	498	33
焊丝	500	27



图9 拉伸试样缩颈  
Fig.9 Shrinkage of tensile specimen

水平拉伸试样的断口形态平坦,纤维状、呈现暗灰色。利用扫描电子显微镜对断口进行观察(如图10),微观形貌均为韧窝,表明试样的断裂是韧性断裂,材料的塑性好。

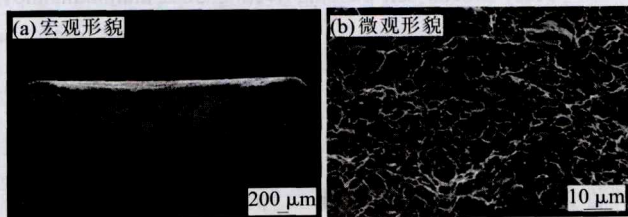


图10 拉伸试样断口形貌  
Fig.10 Fracture morphologies of tensile specimen

## 3 结论

(1) 通过建立堆焊层的焊道搭接量模型,分析了在堆焊成形过程中相邻焊道之间的搭接量,通过试验验证了搭接模型的可靠性。


(2) 分析了成形零件的力学性 (下转第 36 页)

值的 1.5 倍,约为 SAA 组能量吸收值的 1.9 倍。

### 参考文献:

- [1] He Xiacong, Xing Baoying, Zeng Kai, et al. Numerical and experimental investigations of self-piercing riveting [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(1/4): 715-721.
- [2] He Xiacong, Wang Yifeng, Lu Yi, et al. Self-piercing riveting of similar and dissimilar titanium sheet materials [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80: 2105-2115.
- [3] Han L, Thornton M, Shergold M. A comparison of the mechanical behavior of self-piercing riveted and resistance spot welded aluminum sheets for the automotive industry [J]. Materials and Design, 2010, 31(3): 1457-1467.
- [4] 马鸣图, 易红亮, 路洪州, 等. 轮汽车轻量化[J]. 中国工程科学, 2009, 11(9): 20-27.
- [5] 邢宝英, 何晓聪, 唐勇, 等. 自冲铆成形机理及力学性能分析

[J]. 材料导报, 2013(2): 135-138.

- [6] 邢保英, 何晓聪, 唐勇, 等. 铆钉分布形式对自冲铆接头力学性能的影响[J]. 工程力学, 2013(12): 280-285.
- [7] Li D, Han L, Thornton M, et al. Influence of edge distance on quality and static behavior of self-piercing riveted aluminum joints [J]. Material and Design, 2012, 34: 22-31.
- [8] Li D, Han L, Thornton M, et al. Influence of rivet to sheet edge distance on fatigue strength of self-piercing riveted aluminum joints [J]. Materials Science & Engineering A, 2012, 558: 242-252.
- [9] Jacek Mucha. The effect of material properties and joining process parameters on behavior of self-pierce riveting joints made with the solid rivet [J]. Materials and Design, 2013, 52: 932-946.
- [10] 何晓聪, 何家宁, 柯建宏, 等. 自冲铆接头的质量评价及强度可靠性预测[J]. 湖南大学学报, 2010(12): 1-4.
- [11] Luigi Calabrese, Lucio Bonaccorsi, Edoardo Proverbio, et al. Durability on alternate immersion test of self-riveting aluminum joint[J]. Materials and Design, 2013, 46: 849-856. 

(上接第 27 页)

## 3 结论

(1) 堆焊层经 HIP 处理后内部更加均匀致密, 疏松和带状缺陷基本愈合。


(2) 堆焊层经 HIP 处理后主要由  $\gamma$ -Ni(Cr, Fe) 固溶体组成, 晶界处由大量的  $\text{Cr}_2\text{C}_6$  相和少量富 Nb 相组成, 同时晶粒内部分布有许多颗粒状的富 Nb 相以及暗灰色颗粒状的  $\text{Cr}_2\text{Ni}_3$  相。

(3) HIP 后堆焊层的耐磨性变差, 这与 HIP 后堆焊层的硬度下降有关, 磨损机制为磨粒磨损和黏着磨损。

### 参考文献:

- [1] 邵冲, 刘慧渊, 李俊涛, 等. 热等静压在铸造高温合金领域的

应用[J]. 材料导报, 2012, 26(19): 121-124.

- [2] 尚文静. 热等静压(HIP)技术和设备的发展及应用[J]. 有色冶金设计与研究, 2010(1): 18-21.
- [3] 何树先, 王俊, 孙宝德. 热等静压对高温合金薄壁铸件疏松缺陷及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2014, 43(21): 88-90.
- [4] 陈浩泽, 党惊知. 热等静压对 ZLSi7Cu2Mg 合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(7): 67-69.
- [5] 秦斌, 李雅范, 曲兆国. 热等静压技术制造的核主泵屏蔽电机推力盘的性能分析[J]. 中国新技术新产品, 2016(1): 68.
- [6] 郁佳莉, 傅戈雁, 刘双, 等. 核阀密封面无钴镍基熔覆层高温性能研究[J]. 核动力工程, 2013(2): 83-85.
- [7] 李闪, 胡建军, 陈国清, 等. 镍基合金等离子堆焊层的显微组织及摩擦磨损性能[J]. 机械工程材料, 2013(6): 72-77.
- [8] 刘国辉, 车洪艳, 李雅范, 等. 一种热等静压扩散连接制备核电用推力盘的方法: CN103212912[P]. 2013-07-24. 

(上接第 31 页)能, 可知堆焊成形零件的硬度分布与测点位置有关, 从焊道底部向上由于重熔加热的作用越来越小, 导致硬度值逐渐增大, 但硬度分布大致在 150~180HV, 与基板的硬度值相近; 零件试样的拉伸性能较好, 断口为韧性断裂, 材料的塑性好。通过力学性能测试表明堆焊成形零件的力学性能与基板材料的力学性能相近, 能满足零件的使用性能要求。

### 参考文献:

- [1] 单雪海, 周建平, 许燕. 金属快速成型技术的研究进展[J]. 机

床与液压, 2016(7): 150-154.

- [2] 修辉平, 王宏松, 徐敏. 覆膜砂选择性激光烧结的精度分析与试验研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(19): 120-122.
- [3] 肖新华, 行志刚. 多层熔敷堆焊各区域组织及性能研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(11): 233-235.
- [4] 廖海洪, 梁敏洁, 白培康, 等. 镍铝金属粉末选区激光熔化工工艺研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(6): 185-189.
- [5] 尹华, 白培康, 刘斌, 等. 金属粉末选区激光熔化技术的研究现状及其发展趋势[J]. 热加工工艺, 2010, 39(1): 140-144.
- [6] 孟凡军, 朱胜, 巴德玛, 等. 基于 GMAW 堆焊成形的间隔焊道搭接量模型[J]. 焊接学报, 2011(2): 69-71, 116. 